가변구조시스템을 이용한 브러시리스 서보모터의 위치제어

조 창희○ 원 종수
서울대학교 서울대학교

Position Control of Brushless Servo Motor using Variable Structure System

Cho chang-hee Won jong-soo
S.N.U S.N.U

ABSTRACT

Variable Structure System(VSS) is being extended to a new control system of ac servo machines for its merits of simple mechanism and robustness. This paper has studied about applying VSS to position control for brushless servo motor. But VSS has the chattering problem of control input. This chattering phenomenon cause acoustic noises, torque ripple and increse harmonics of the current . One of the useful way to eliminate this defect of VSS, linearlizing the switching function is discussed here. Though the conventional method of linearizing the switching function diminishes the chattering, it may degrade the robustness of the system. In this paper, new linearized switching function which shows robust performance to the parametric variation and reduces chattering simultanously is introduced and assured by simulation.

Ⅰ. 서론

가변 구조 시스템(Variable Structure System VSS)은 시스템의 상태 변수들이 위상 평면상에서 주어진 임의의 불연속면(Switching Surface)과 교차할 때 제어기의 구조를 절환하여 새로운 특성을 갖도록 하는 시스템으로 과도 상태에 있어서 빠른 시응답을 얻을 수 있고 제어계의 파라미터 변동이나 외란에 둔감하며 제어기의 구조가 비교적 간단한 점 등 많은 장점을 갖고 있다. 따라서, 빠른 응답속도와 정밀도, 제어계의 강인성(Robustness) 등을 요구하는 서보 제어분야에 효과적으로 응용되고 있다.

그러나, 제어기의 구조절환을 기본으로 하는 VSS는 필연적으로 제어입력의 채터링(Chattering)을 발생시키며 제어주기(T_{samp})가 유한한 디지탈 제어 시스템의 경우에는 그 문제가 심각하다.

VSS 에서 제어입력의 채터링은 모터 토크의 맥동을 수반하며 전류의 고조파 성분을 증가시키는 원인이되어 실제 시스템에 적용시키에는 바람직하지 않다. 이러한 채터링을 감소시키는 방안으로써 본 연구에서는 새로운 선형 스위칭 함수를 도입하여 종래의 선형스위칭 함수 방법의 문제점인 제어계의 강인성의 악화를 개선시켰으며 동시에 채터링 현상을 줄였다.

Ⅱ. 브러시리스 DC 모터의 모델링

브러시리스 DC 모터 (BLDCM)는 무 보수성의 구조와 제어의 편이성 및 높은 효율로 기존의 정류자를 갖는 모터를 대신하여 널리 쓰이고 있다.

기준좌표 이론에 의해 d-q축으로 환산된 BLDCM의 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_{qs} = r s i_{qs} + \omega_r \lambda_{ds} + p\lambda_{qs}$$

$$V_{ds} = r s i_{ds} - \omega_r \lambda_{qs} + p\lambda_{ds} \qquad (2.1)$$

여기서, $\lambda_{qs} = L_q i_{qs}$

$$\lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \lambda_m$$

(λ_m은 영구자석에 의한 전기자 쇄교자속)

모터의 토크는

$$T_M = (3/2)(P/2)\{\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}\} \qquad (2.2)$$

이다. 본 연구에서 사용한 모터는 자석이 회전자의

표면에 돌출되어 있는 surface type의 BLDCM이므로 $L_d = L_q$ 이다. 그러므로 토크식은

$$T_M = (3/2)(P/2)\lambda_m i_{qs} = K_T\, i_{qs} \qquad (2.3)$$

가 된다.

모터에 연결된 기계적인 부분의 모델은 다음식으로 주어진다.

$$T_M = J(d\omega/dt) + B\omega + T_L \qquad (2.4)$$

이상에서 $X = [\, i_{qs}\ i_{ds}\ \omega_r \,]^T$ 를 상태 벡터로 취했을 때 BLDCM의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BV + CT_L \qquad (2.5)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{r_s}{L_q} & -\frac{\omega_r L_d}{L_d} & -\frac{\lambda_m}{L_q} \\ -\frac{\omega_r L_q}{L_d} & -\frac{r_s}{L_d} & 0 \\ \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2\frac{\lambda_m}{J} & \frac{3}{2}\left(\frac{P}{2}\right)^2\frac{(L_d-L_q)i_{qs}}{J} & -\frac{B_m}{J} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad V = \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{P}{2}\ \ \frac{1}{J} \end{bmatrix}$$

Ⅲ. 슬라이딩모드 제어기에 의한 위치제어시스템의 설계

VSS는 제어대상 플랜트의 상태에 따라 상태공간에서 정의된 임의의 스위칭 평면에서 제어구조를 불연속적으로 바꾸어 슬라이딩 모션(Sliding Motion)이라는 독특한 특성을 나타낸다.

슬라이딩모드 제어기를 이용한 BLDCM의 위치제어 시스템의 전체 블록선도는 그림 1과 같으며 간략화된 블록선도는 그림 2와 같다.

그림 2의 단순 블럭선도에서 제어시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & -B/J \end{bmatrix}\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_t/J \end{bmatrix} i_q + \begin{bmatrix} 0 \\ -1/J \end{bmatrix} T_L \qquad (3.1)$$

여기서, $X_1 = \theta_{ref} - \theta$

$X_2 = -\theta = -\omega = -\dot{X}_1$

$\dot{X}_2 = (d\omega/dt) = [\, K_t i_q - T_L - B\omega \,]/J$

스위칭 평면은 다음식으로 정의된다.

$$s = \dot{X}_1 + cX_1 \qquad (3.2)$$

여기서 c는 슬라이딩 라인의 기울기이며 1/c 는 시스템의 시정수로서 작용한다.

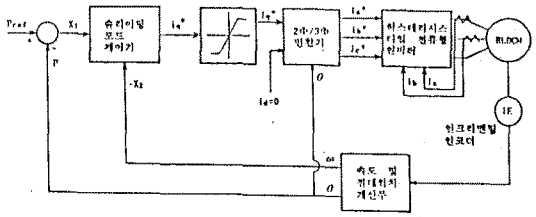


그림 1. 슬라이딩 모드 제어기를 이용한 BLDCM 위치 제어 시스템의 전체 블럭선도

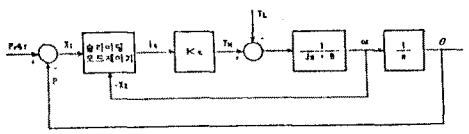


그림 2. 단순 블럭선도

브러시리스 서보 시스템에서

$$\dot{s} = \ddot{X}_1 + c\dot{X}_1 = -\frac{d\omega}{dt} - c\omega \qquad (3.3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B}{J}\omega - \frac{1}{J}T_L + \frac{1}{J}K_t i_q \qquad (3.4)$$

이므로

$$\dot{s} = \left(\frac{B}{J} - c\right)\omega + \frac{1}{J}T_L - \frac{1}{J}K_t i_q \qquad (3.5)$$

여기에 s 를 곱하고 $i_q = K\,\mathrm{sgn}(s)$ 를 대입하면

$$s\dot{s} = s\left\{\left(\frac{B}{J} - c\right)\omega + \frac{1}{J}T_L\right\} - \frac{1}{J}K_t K\,|s| \qquad (3.6)$$

이고 슬라이딩 모드의 존재조건 $s\dot{s} < 0$ 에서 제어입력의 계인 K는

$$K > \frac{(B - cJ)\omega + T_L}{K_t} \qquad (3.7)$$

로 결정된다.

Ⅳ. 선형 스위칭 함수의 채택

가변구조 시스템은 본질적으로 구조를 절환하는 시스템이므로 불연속의 제어입력은 맥동현상을 일으킨다. 가변구조는 이상적인 경우 제어입력의 주기(T_{samp})가 zero 이다 그러나 실제의 디지탈 제어계 시스템에 있어서 이것은 실현불가능하며, 또 스위칭 기구의 불완전성 등에 의하여 이 현상은 더 심해지게 된다. 이러한 채터링 현상은 스위칭손실, 토크의 맥동, 전류의 고조파, 소음등을 가중시키는 요소로 가변구조 시스템의 문제점 중의 하나이다.

이러한 채터링의 해결수단으로 많이 쓰이고 있는 제어입력의 선형화 방법은 다음과 같다.

$$u = K \frac{s}{|s| + \delta} \qquad (4.1)$$

여기서, δ 는 양의 상수

그러나, 선형화에 따르는 문제점으로 채터링이 줄어드는 대신에 시스템의 강인성이 떨어지는 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 채터링을 저감시키면서도 시스템의 강인성을 유지시키기 위해 다음과 같은 새로운 스위칭함수에의한 선형 제어 입력을 제안한다.

$$u = K \frac{s}{|s| + \gamma} \qquad (4.2)$$

$$\text{여기서, } \gamma = \delta_0 + \delta_1 \left| \int \frac{1}{s}\, dt \right| \qquad (4.3)$$

$$|s| \geq \varepsilon \text{ 이면 } \quad \delta_0 = 0,\ \delta_1 = \zeta_1$$

$$< \varepsilon \text{ 이면 } \quad \delta_0 = \zeta_0,\ \delta_1 = 0$$

$T_L=0$ 인 경우 시스템의 특성방정식이 다음식 과 같이 주어진다.

$$\ddot{X}_1 + (K_t i_q X_1 + B\dot{X}_1)/J = 0 \qquad (4.4)$$

시스템의 음의 고유치는

$$\rho = -\frac{1}{2J} \left\{ B + \sqrt{B^2 - 4JK_t i_q} \right\} \qquad (4.5)$$

가 되고 위상 평면의 4사분면의 $s < 0$ 인 부분에서는

$$\rho = -\frac{1}{2J} \left\{ B + \sqrt{B^2 + 4JK_t |s|/(|s| + m)} \right\} \qquad (4.6)$$

안정된 슬라이딩 모드로 동작하기위해서는 슬라이딩 라인의 기울기 c가 다음 조건을 만족하여야한다.

$$|\rho| \geq |c| \qquad (4.7)$$

그림 3 은 s에 따라 최대로 취할수 있는 c값(c_{max}) 을 $\delta = 0$ 일때의 ρ값(ρ_{max})를 1로 본 p.u 값으로 $m = \delta$ 또는 $m = \gamma$ 일 때에 대해 각각 그린 것이다. δ값이 클수록 c_{max} 가 작아지는 경향을 볼 수 있다. 그리고 새로운 선형 스위칭 함수를 적용한 경우 기존의 고정된 δ를 갖는 선형 스위칭 함수 보다 넓은 범위에서 큰 c_{max}값을 갖는 것을 알 수 있다. 이것은 새로운 스위칭 함수를 적용한 것이 보다 강인한 시스템이라는 것을 의미한다.

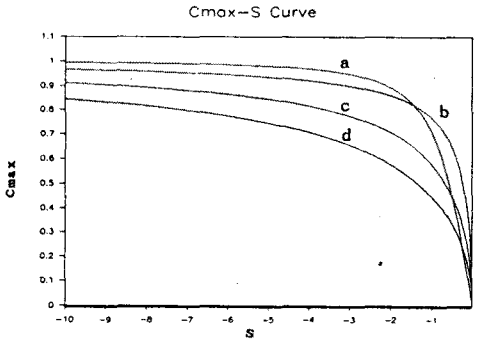


그림 3 c_{max} - s 곡선

a : $m = \gamma$ b : $m = \delta = 0.7$
c : $m = \delta = 2$ d : $m = \delta = 4$

Ⅴ. 시뮬레이션

시뮬레이션은 4차의 Runge-Kutta 알고리즘을 이용하여 기존의 연속인 제어입력과 제안된 연속제어입력의 슬라이딩모드 제어기를 이용한 BLDCM의 위치제어에 대해 행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모터 정수 및 콘트롤러의 제어 정수는 각각 표 1. 및 표 2.와 같다. 시뮬레이션 결과는 그림 4 에서 그림 9 까지에 나타나 있다. δ를 0.7로 고정시킨 경우는 이너셔를 증가 시켜도 오버슛은 없으나 제어입력의 채터링이 발생하며 δ를 4 로 고정시킨 경우에는 제어입력의 채터링이 많이 사라졌으나 이너셔를 증가시키면 위치응답의 오버슛을 볼 수 있다. 새로 제안한 제어입력은 위치응답의 오버슛도 없고, 채터링도 많이 감소된 좋은 특성을 보임을 알 수 있다.

표 1. 모터의 사양

파라메터	값 [단위]
정격출력	1 [kW]
정격전압	90 [V]
정격전류	7.9 [A]
관성계수	0.00314 [Kg-m²]
자극 수	8
전기자 저항	0.82 [Ω]
전기자 인덕턴스	6 [mH]

표 2. 제어기의 정수

파라메터	값
T_{samp}	1 [ms]
c	20
K_t	0.606 [N/A]
K	10
ζ_0	4
ζ_1	1000

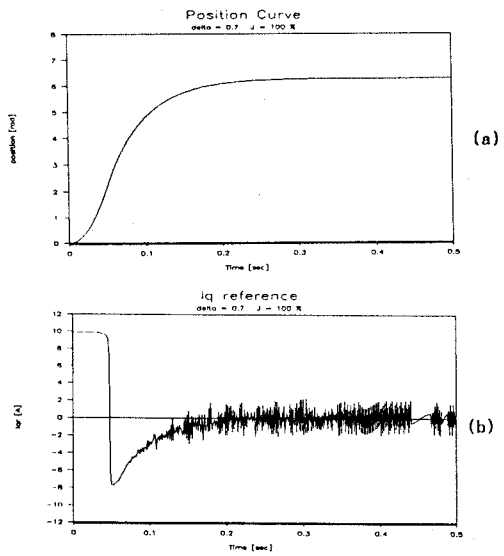


그림 4 δ = 0.7, J = 100 % 일때 기존 선형 스위칭 함수 제어시의 위치(a), 전류(b) 파형

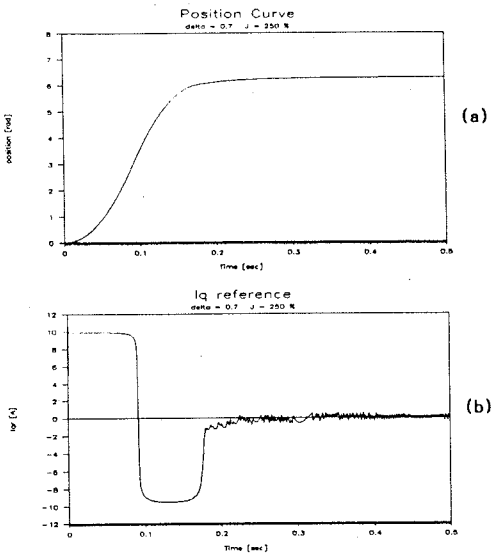


그림 5 δ = 0.7, J = 250 % 일때 기존 선형 스위칭 함수 제어시의 위치(a), 전류(b) 파형

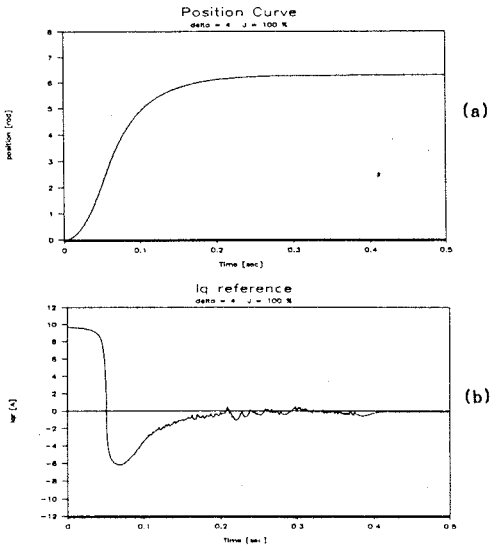
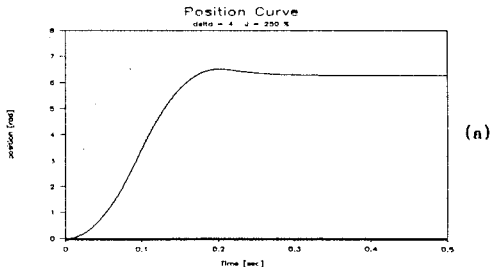


그림 6 δ = 4, J = 100 % 일때 기존 선형 스위칭 함수 제어시의 위치(a), 전류(b) 파형



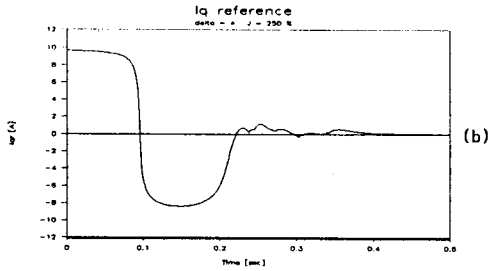


그림 7 δ = 4, J = 250 % 일때 기존 선형 스위칭 함수 제어시의 위치(a), 전류(b) 파형

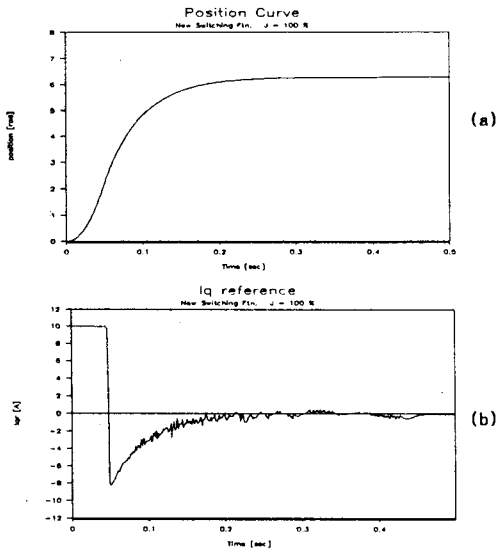


그림 8 J = 100 % 일때 새로운 선형 스위칭 함수 제어시의 위치(a), 전류(b) 파형

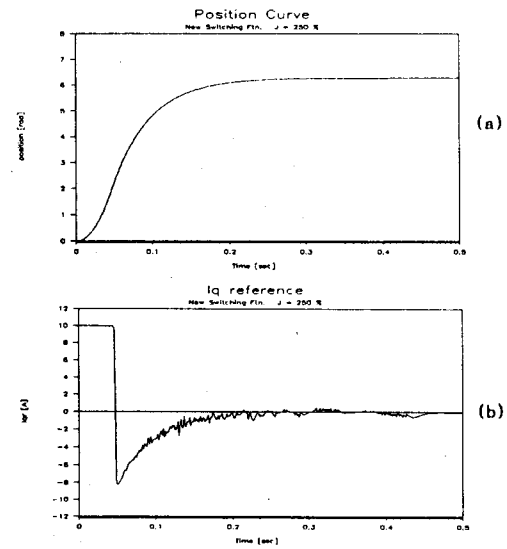


그림 9 J = 250 % 일때 새로운 선형 스위칭 함수 제어시의 위치(a), 전류(b) 파형

VI. 결론

본 논문에서는 제어기의 구조가 간단하면서도 제어 성능이 뛰어난 가변구조 시스템을 이용하여 BLDCM의 위치 제어를 수행하였다. 새로운 선형 스위칭함수를 도입함으로써 제어 입력의 채터링을 줄이면서도 시스템의 강인성을 잃지 않는 특성을 구현했으며 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 확인하였다.

VII. 참고 문헌

[1] Vadam I. Utkin , "Variable Structure with Sliding Mode", IEEE Trans. on AC., Vol. AC-22, No. 2, pp. 212-222, Apr. 1977.

[2] C. Namuduri, P.C. Sen , "A Servo-Control System using a Self-Controlled Synchronous Motor (SCSM) with Sliding Mode Controller", Conf. Rec.of the IEEE IAS Annual Meeting pp.56-65, 1986.

[3] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery', McGraw-Hill, Inc. 1986

[4] H. Hashimoto, H. Yamamoto, S. Yanagisawa, and F. Harashima, "Brushless Servo Motor Control Using Variable Structure Approach", IEEE Trans. on IA., Vol. 24, No. 1, Jan./Feb. 1988.

[5] H. Hashmoto, K. Maruyama, and F. Harashima, "A Microprocessor-Based Robot Manipulator Control with Sliding Mode", IEEE Trans. on IE., Vol. IE-34, No. 1., Feb. 1987